

تعیین شاخص‌های فیزیکی و ژئومورفولوژیکی مؤثر بر رخداد انواع جریان‌های سیلابی در حوزه آبخیز سد کرج

مهدی خلج‌زاده^۱، قربان وهاب‌زاده^{۲*}، سادات فیض‌نیا^۳، علی‌اکبر نظری سامانی^۴ و سید رمضان موسوی^۵
^۱ دانشجوی دکتری آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران، ^۲ دانشیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ^۳ استاد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران، ^۴ دانشیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران و ^۵ استادیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۰۵

چکیده

شناسایی فرایندهای هیدروژئومورفیک نظیر سیلاب عادی (normal flood)، سیلاب واریزه‌ای (debris flood) و جریان واریزه‌ای (debris flow) با توجه به رژیم رسوبی و خطرات و خسارات مختلف بسیار ضروری می‌باشد. در سال‌های اخیر کمبود اطلاعات میدانی موجبات نیاز به استفاده از مدل‌های مبتنی بر اطلاعات پایه حوزه آبخیز را فراهم کرده است. هدف از این مطالعه، توسعه روش کاربردی برای پیش‌بینی رخداد انواع جریان سیلابی با استفاده از ویژگی‌های فیزیکی (ژئومورفومتری) و ژئومورفولوژیکی حوزه می‌باشد. این پژوهش، با استفاده از روش توصیفی-تحلیلی و ابزارهایی مانند عکس‌های هوایی، تصاویر ماهواره‌ای، نقشه‌های توپوگرافی و سامانه GIS انجام شد. در روش توصیفی، ارزیابی میدانی رسوبات انواع جریان‌های سیلابی ۲۸ تیرماه سال ۱۳۹۴ در ۷۰ زیرحوزه آبخیز سد کرج انجام شد. از ۷۰ زیرحوزه مطالعاتی، ۳۰ زیرحوزه جریان واریزه‌ای، ۱۶ زیرحوزه سیلاب واریزه‌ای و ۲۴ زیرحوزه با سیلاب عادی مواجه شدند. در روش تحلیلی، در هر زیرحوزه، ۳۲ عامل ژئومورفومتری از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با دقت مکانی ۲۵ متر و پنج پارامتر ژئومورفولوژیکی از نقشه رخساره‌های فرسایش توده‌ای، استخراج و به‌منظور تعیین ارتباط با نوع جریان‌های سیلابی مشاهداتی به برنامه آماری SPSS منتقل شد. نتایج تحلیل واریانس یک مرحله‌ای (ANOVA) و مقایسه چندگانه بونفرونی (multiple comparisons Bonferroni) نشان داد، چهار عامل مورفومتری طول آبراهه اصلی (L_m)، محیط حوزه (P)، طول حوزه (L_b) و میانگین عرض حوزه (W_b) در تفکیک انواع جریان سیلابی مؤثر شناسایی شدند. به‌منظور انتخاب دو پارامتر کلیدی مناسب‌تر و مقادیر آستانه آن‌ها، بررسی رابطه زوجی چهار متغیر در شش نمودار (کرت) پراکنش سه‌گانه نقطه‌ای نشان داد طول آبراهه اصلی (L_m) و میانگین عرض حوزه (W_b) مناسب‌ترین عوامل مؤثر برای پیش‌بینی جریان‌های سیلابی با کمینه مجموع خطاهای موجود در محدوده طبقات تفکیکی جریان‌ها بر روی نمودارها بودند که در حوزه‌های طولانی با $L_m > 4$ کیلومتر سیلاب عادی و در حوزه‌های کوتاه با $L_m < 4$ کیلومتر اگر $W_b > 1$ کیلومتر باشد، سیلاب واریزه‌ای و چنانچه $W_b < 1$ کیلومتر باشد، جریان واریزه‌ای ایجاد می‌شود. نتایج تحلیلی نشان داد که مدل مورفومتری دارای دقت مطلوب در طبقه‌بندی صحیح حدود ۹۴، ۸۸ و ۸۳ درصد از حوزه‌های بالای سد و ۹۱، ۸۳ و ۸۸ درصد از حوزه‌های پایین سد، به‌ترتیب برای وقوع جریان واریزه‌ای، سیلاب واریزه‌ای و سیلاب عادی بوده است. پیش‌بینی رژیم رسوبی جریان‌های سیلابی و انجام اقدامات متناسب و سریع آبخیزداری در مواقع بحرانی از امتیازات این مدل کاربردی محسوب می‌شود.

واژه‌های کلیدی: جریان واریزه‌ای، حرکت توده‌ای، سامانه اطلاعات جغرافیایی، مورفومتری، هیدروژئومورفیک

مقدمه

(Feiznia, ۲۰۰۸).

جریان واریزه‌ای^۴ یا جریان گلی^۵: جریان ترکیبی هوموژن و تک فاز است و شبیه ملات بتن مرطوب که غلظت مواد جامد در سیال بین ۷۰ تا ۹۰ درصد وزنی و ۴۷ تا ۷۷ درصد حجمی متغیر می‌باشد و شکل ناهم‌واری آن‌ها به صورت دیواره‌های حاشیه‌ای در کنار آبراهه است (Costa, ۱۹۸۸؛ Hunger و همکاران، ۲۰۰۱؛ Feiznia, ۲۰۰۸؛ Yamani و همکاران، ۲۰۱۰). دبی پیک آن‌ها حدود دو تا ۵۰ برابر دبی پیک جریان سیلاب عادی با دوره بازگشت ۲۰۰ ساله می‌باشد. حجم مواد حمل شده به وسیله یک جریان واریزه‌ای حدود ۱۵۰ تا ۲۰۰ برابر حجم مواد سیلاب واریزه‌ای و ۱۶۰ تا ۳۰۰ برابر حجم مواد جریان رودخانه‌ای معمولی است و اندازه ذرات رسوبات آن از حد رس تا تخته سنگ متغیر و درجه جورشدگی ذرات رسوبات آن بسیار ضعیف است (Feiznia, ۲۰۰۸).

نتایج پژوهش Costa و Fleisher (۱۹۸۴) نشان داد، ضریب جورشدگی تراسک^۶ $s_0 = \left(\frac{D_{75}}{D_{25}}\right)^{0.5}$ شاخص مناسبی برای تعیین جورشدگی رسوبات جریان‌های سیلابی هستند که در آن D_{25} و D_{75} به ترتیب اندازه مربوط به ۷۵ و ۲۵ درصد فراوانی ذرات رسوب در منحنی دانه‌بندی تجمعی بوده، مقدار این ضریب برای جریان واریزه‌ای بین ۳/۶ تا ۱۲/۳، برای سیل عادی ۱/۸ تا ۲/۷ و حد واسط برای سیلاب واریزه‌ای یا جریان غلیظ بین ۲/۷ تا ۳/۶ متغیر می‌باشد.

در کالیفرنیا، Johnson (۱۹۷۰) با ترسیم منحنی‌های دانه‌بندی رسوبات سیلاب واریزه‌ای در دو منطقه رسوب‌گذاری و منشاء به فاصله یک کیلومتری نشان داد که در این فاصله دانه‌بندی رسوبات در منطقه رسوب‌گذاری با دانه‌بندی منطقه منشاء تفاوت چندانی نداشته، جورشدگی آن نیز تغییر چندانی نکرده بود.

در کشور چین، Zhang و همکاران (۲۰۱۵) در ۲۷ زیرحوضه رودخانه جین‌شا، ضمن بررسی و

فرایندهای مختلف حمل رسوب و تفاوت‌های هیدرولیک آن‌ها موجب شده است تا آثار و شواهد به‌جا مانده از هر جریان تفاوت‌های زیادی با یکدیگر داشته باشند. در مراحل اولیه انجام پروژه‌های آمایش سرزمین، شناسایی نوع فرایند غالب به علت تفاوت ویژگی‌های مختلف خطر، ضروری است (Hunger و همکاران، ۲۰۰۱).

در بیشتر مواقع، جریان‌های سیلابی در حوزه‌های آبخیز دارای رژیم‌های متفاوت آب و رسوب بوده، از جریان‌های صاف تا بسیار غلیظ تغییر می‌یابند و شناسایی و تفکیک آن‌ها با ارزیابی دقیق صحرایی، پس از وقوع جریان امکان‌پذیر است (Arattano و Franzl, ۲۰۰۴). تا کنون، از نظر شرایط جریان آب و خصوصیات رسوب‌شناسی و ژئومورفیک رسوب، سه نوع جریان مختلف در حوضه‌های کوهستانی شناخته شده است. این سه نوع فرایند هیدروژئومورفیک^۱ عبارتند از سیلاب عادی، سیلاب واریزه‌ای و جریان واریزه‌ای که ویژگی‌های کلی آن‌ها به شرح زیر است. **سیلاب عادی^۲:** بر اساس مطالعات Costa (۱۹۸۸) و Hunger و همکاران (۲۰۰۱)، جریان سیلابی معمولی حاوی غلظت وزنی یک تا ۴۰ درصد و غلظت حجمی کمتر از ۲۰ درصد بوده، فرم بستر رودخانه در آن‌ها به صورت بار یا پشته رسوبی مشاهده می‌شود. درجه جورشدگی رسوبات آن خوب تا متوسط است (Feiznia, ۲۰۰۸).

سیلاب واریزه‌ای یا جریان غلیظ^۳: بر اساس مطالعات Hunger و همکاران (۲۰۰۱ و ۲۰۰۵)، شامل مخلوطی از حجم فراوان رسوبات بستر و کناره‌های آبراهه به همراه جریان سیلاب عادی می‌باشد که دارای غلظت ۴۰ تا ۷۰ درصد وزنی و ۲۰ تا ۴۷ درصد حجمی و دبی پیک حدود دو تا سه برابر سیلاب معمولی با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله بوده، حاوی قطعات سنگی کوچک‌تر از یک متر است. درجه جورشدگی ذرات رسوبات آن ضعیف می‌باشد

^۴ Mud flows^۵ Debris flows^۶ TRASK^۱ Hydrogeomorphic processes^۲ Water floods or stream flows^۳ Debris floods or hyperconcentrated flows

مورد بررسی قرار می‌گیرد. مقادیر کمتر از ۰/۵ نشان از جورشدگی خوب، ۰/۵ تا یک جورشدگی متوسط و بیشتر از یک دارای جورشدگی بد می‌باشد (رابطه ۲). مقادیر ۵، ۱۶، ۸۴ و ۹۵ به ترتیب اندازه‌های مربوط به پنج، ۱۶، ۸۴ و ۹۵ درصد فراوانی ذرات رسوب در منحنی دانه‌بندی تجمعی است.

$$SDI = \frac{\theta_{84} - \theta_{16}}{4} + \frac{\theta_{95} - \theta_5}{6.6} \quad (2)$$

در حوزه آبخیز خیاوچای مشکین‌شهر، مطالعه Ghiasi (۲۰۱۴) بر روی خصوصیات رسوب‌شناسی و مکانیک رسوبات جریان و مناطق منشأ نشان داد، دامنه تغییرات شاخص تراسک نمونه‌های رسوبات سیلاب معمولی بین دو تا ۳/۵۶ و جریان غلیظ (جریان واریزه و سیلاب واریزه‌ای) بین ۴/۹۳ تا ۱۵/۴۱ بود. همچنین، مقادیر شاخص‌های میانگین، جورشدگی، چولگی و کشیدگی را مانند قطرهای شاخص ذرات، برای تفکیک جریان‌های سیلابی کارآمد معرفی کرد.

در داخل کشور، مطالعاتی در زمینه تاثیر ویژگی‌های فیزیکی حوضه بر خصوصیات ریخت‌سنجی رسوبات انجام شده است. در تحقیقی Khaledi و Darvishan (۱۹۹۸) درحوضه واز مازندران، مساحت و فاصله از مرز بالایی حوضه را مؤثرترین ویژگی‌های فیزیکی حوضه بر خصوصیات ریخت‌سنجی رسوبات سیلاب‌های رودخانه معرفی کردند.

طی تحقیقی، Adine و همکاران (۲۰۱۲) در منطقه قلعه سر استان مازندران نشان دادند، عامل فاصله از مرز بالایی حوضه، عامل ریخت‌سنجی D_{50} (میانه قطر ذرات رسوبات با فراوانی ۵۰ درصد) را کنترل می‌کند. در همان منطقه، Kaviani و همکاران (۲۰۱۳) به این نتیجه رسیدند که روند تغییرات مکانی خصوصیات مورفومتری ذرات (میانگین، انحراف از معیار یا جورشدگی، چولگی و کشیدگی) رسوبات بستر به طرف پایاب رودخانه، تحت تأثیر عوامل فیزیوگرافی، لیتولوژی و زمین‌ساخت منطقه می‌باشد.

در حوزه آبخیز سد تبارک در شمال قوچان Rezapoor Soltani و Ghaemi Moghadam (۲۰۱۲)، طی مطالعه‌ای نشان دادند که رخساره‌های رسوبی تشکیل شده، شامل رخساره‌های گراولی (Fl, Fr, Fm) و گلی (Sm)، ماسه‌ای (Gcm, Gmm)

نمونه‌برداری از پروفیل رسوبات واریزه‌ای و برآورد چهار پارامترکلیدی، شامل میانگین اندازه ذرات، چولگی، کشیدگی و انحراف معیار (جورشدگی)، اقدام به معرفی شاخص انتقال انرژی ذرات و طبقه‌بندی رسوبات در پنج گروه معین نموداری کردند.

در داخل کشور، بیشتر مطالعات ریخت‌سنجی رسوب‌شناسی جریان‌های سیلابی انجام شده است. در مطالعه انجام شده به‌وسیله Najafi Nejad و همکاران (۲۰۰۵ و ۲۰۰۷) در حوزه آبخیز زیارت‌گران خصوصیات رسوب‌شناسی و هیدرولیک سیلاب واریزه‌ای بررسی شده است. مقایسه خصوصیات ریخت‌سنجی رسوبات مناطق رسوب‌گذاری و منشأ تفاوت معنی‌داری را نشان نداد، ولی مقایسه جورشدگی نسبتاً ضعیف ذرات رسوب سیلاب واریزه‌ای بیان‌گر تفاوت آشکار آن با سیل عادی بوده است.

در حوضه علی‌آباد دماق استان همدان، پژوهش Mohseni و Khodabakhsh (۱۹۹۹) با تکیه بر مطالعات صحرائی بر روی خصوصیات رسوب‌شناسی جریان سیلابی، نشان داد که جریان مورد مطالعه، از نوع مختلط (جریان واریزه) بوده، با سیلاب عادی، تفاوت عمده‌ای داشته است. بررسی ضریب تراسک با میانگین ۹/۵۵، نشان از جورشدگی بد و عدم لایه‌بندی رسوبات جریان مورد مطالعه داشته است.

در تحقیقات Jandaghi و Mohammadi (۲۰۰۲) و Jandaghi و همکاران (۲۰۰۴) جریان‌های سیلابی حوضه زیارت‌گران از نظر خصوصیات رسوب‌شناسی مورد مطالعه قرارداد شده. میانگین ضریب تراسک نمونه‌های رسوبی را ۱۰/۷۱، ضریب تقارن را منفی، انحراف معیار ترسیمی جامع (ضریب جورشدگی فولک) را ۴/۶ و متوسط اندیس کرومباین را ۴/۰۸ اعلام کردند. جورشدگی ذرات رسوب برای جریان‌های مورد مطالعه از نوع جورشدگی بسیار بد و رسوبات، بدون لایه‌بندی بوده، نشان از جریان مختلط (واریزه‌ای) داشته است.

انحراف معیار جامع^۱ لگاریتمی فولک و وارد به‌عنوان بهترین روش برای تعیین جورشدگی رسوبات است که در آن حدود ۹۰ درصد توزیع اندازه ذرات

¹ Inclusive Standard Deviation

حوضه‌هایی با ضریب ملتون کمتر از ۰/۳ را سیلابی عادی و حوضه‌های با ضریب ملتون بیشتر از ۰/۳ را جریان واریزه‌ای اعلام کردند.

از بررسی پژوهش‌های صورت پذیرفته در داخل و خارج از کشور، چنین جمع‌بندی می‌شود که بیشتر محققین داخلی بر اساس خصوصیات رسوب‌شناسی آزمایشگاهی به تفکیک جریان‌های سیلابی در یک یا دو حوضه پرداخته‌اند و معیارهای ژئومورفیک میدانی رسوبات کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در بعضی مطالعات، ارتباط ریخت‌سنجی رسوبات با خصوصیات فیزیکی یک حوضه و یا پارسل‌های یک حوضه مورد بررسی قرار گرفته است. در خارج از کشور نیز بیشتر محققین و متخصصین هیدرولوژی و ژئومورفولوژی سعی در بررسی عوامل مؤثر مورفومتری حوضه در یک جریان سیلابی واحد (مثلاً سیلاب یا جریان واریزه) دارند. مهمترین رویکرد نوین پژوهش حاضر در مقایسه با دیگر تحقیقات مرتبط در داخل و خارج از کشور، استفاده از سناریوهای مختلف جریان سیلابی عادی، سیلاب واریزه‌ای و جریان واریزه‌ای و ارزیابی تلفیقی مطالعات آزمایشگاهی و میدانی رسوب‌شناسی و استفاده از ۳۷ ویژگی ژئومورفومتری و ژئومورفولوژی حوزه آبخیز مؤثر بر تولید رسوب و رواناب حوضه‌ها در سطح ۷۰ زیرحوزه آبخیز بوده است و این مهم در وقایع سیلابی ۲۸ تیر ماه ۱۳۹۴ در حوزه آبخیز سد کرج با انجام بازدیدهای مکرر میدانی و با وجود شناخت قبلی نگارندگان از منطقه صورت پذیرفته است. هدف اصلی پژوهش حاضر، تعیین شاخص‌های کلیدی ژئومورفومتری و ژئومورفولوژی مؤثر در رخداد انواع جریان سیلابی در حوزه آبخیز می‌باشد که با فرض وجود رابطه آماری بین ویژگی‌های مذکور و نوع جریان مشاهداتی در زیرحوزه‌های آبخیز سد کرج انجام شده است. ضرورت بررسی خطرپذیری حوضه‌ها و سکونت‌گاه‌های روستایی و مناطق تفرج‌گاهی مخصوصاً در محور کرج-چالوس در اثر وقوع فرایندهای مختلف هیدروژئومورفیک احساس می‌شود. مطالعه انجام شده در حوزه آبخیز سد کرج، به دلیل سابقه وقوع سیلاب‌های واریزه‌ای و بروز خسارات فراوان جانی و مالی به مردم منطقه از طریق تخریب زیرساخت‌ها و تأسیسات منطقه، انتقال مقادیر فراوان

نتیجه تاثیر عوامل فیزیوگرافی، زمین‌ریخت‌سنجی و سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه بوده است.

طی مطالعه‌ای در رودخانه مادر سو جنگل گلستان، Yamani و همکاران (۲۰۱۰) به روش توصیفی-تحلیلی انواع جریان‌های سیلابی رخ داده را طبقه‌بندی کرده و نشان دادند که در ایجاد جریان‌های مواد، پارامترهایی چون خصوصیات رسوب‌شناسی و حرکت‌های دامنه‌ای و عوامل مؤثر در رسوب‌زایی مورد اهمیت جدی قرار می‌گیرند.

بررسی شرایط مناسب رخداد سیلاب‌های واریزه‌ای کشور در مطالعات Banihabib (۱۹۹۵) و Banihabib و Jamali Sadat (۲۰۱۵) نشان داد، حرکت‌های توده‌ای و شیب‌های بیش از ۱۵ تا ۵۰ درجه، برای وقوع جریان واریزه‌ای دامنه‌ای مناسب هستند. در ادامه، Banihabib و Iranpoor (۲۰۱۰) با نگاهی بر سیلاب ماسوله، به تفاوت هیدرولوژی و هیدرولیک جریان‌های سیلابی پرداخته و میزان دبی پیک جریان غلیظ را ۱۰ برابر سیلاب عادی برآورد کردند.

در مطالعات خارج از کشور، برای بررسی تأثیر ویژگی‌های فیزیکی حوضه بر خصوصیات جریان سیلابی، Wilford و همکاران (۲۰۰۴) طی مطالعه در ۶۵ حوزه آبخیز واقع در کشور کانادا نتیجه گرفتند، آستانه عددی دو عامل طول حوضه و ضریب ملتون حوضه، شامل اختلاف ارتفاع بر ریشه دوم مساحت حوضه (رابطه ۳) برای طبقه‌بندی جریان‌های سیلابی زیرحوضه‌ها مناسب هستند. حوضه‌های با ضریب ملتون کمتر از ۰/۳ را سیلابی معمولی، ۰/۳ تا ۰/۶ و یا بیشتر از ۰/۶ (با طول حوضه بیش از ۲/۷ کیلومتر) را سیلابی واریزه‌ای و حوضه‌های با ضریب ملتون بیشتر از ۰/۶ (با طول حوضه کمتر از ۲/۷ کیلومتر) را مستعد بروز جریان واریزه‌ای معرفی کردند.

$$MR_n = \Delta H / (A)^{0.5} \quad (3)$$

به‌منظور واسنجی روش ویلفورد، Davies و Welsh (۲۰۱۱) در ۱۸ حوزه آبخیز واقع در منطقه بریتیش کلمبیا اقدام به دسته‌بندی زیرحوضه‌ها بر اساس ضریب ملتون و ایجاد رابطه با معیارهای ژئومورفیک رسوبی کردند.

در جنوب کانادا، Jackson و همکاران (۱۹۸۷) اقدام به تفکیک جریان‌های سیلابی حوضه‌ها کردند،

رسوبات و آلودگی‌های زیست‌محیطی به مخزن سد امیرکبیر انجام پذیرفته است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد پژوهش: شامل ۷۰ زیرحوضه فرعی کوهستانی در حوزه آبخیز سد امیرکبیر از حوزه آبخیز رودخانه شور، به وسعت تقریبی ۳۸۰۰۰ هکتار در شمال شرقی شهرستان کرج، استان البرز و در محدوده مختصات UTM (۵۰۱۵۱۵ تا ۵۴۹۰۶۹ متر، طول شرقی) و (۳۹۶۰۲۹۱ تا ۴۰۰۳۴۱۷ متر، عرض شمالی) واقع شده است (شکل ۱). کمینه ارتفاع حوضه سد، ۱۳۲۰ متر از سطح دریا در حوضه جهان‌نما و بیشینه ارتفاع ۴۳۷۰ متر از سطح دریا در ارتفاعات کندوان است. ۲۵ حوضه فرعی کوهستانی در پایین سد کرج به منظور آزمون روش مورد مطالعه، مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

فیزیوگرافی، اقلیم و هیدرولوژی: حوزه آبخیز بالای سد کرج به‌عنوان محدوده تجمع رواناب و جریان‌ات سطحی و هدایت آن به دریاچه سد و رودخانه کرج می‌باشد. باران‌های شدید پاییز و بهار و به‌ویژه باران بر روی برف، دبی اوج قابل توجهی را تولید می‌کند. شیب میانگین حوضه ۵۳ درصد و اقلیم حوضه از نوع اقلیم مشابه سرد و نیمه‌مرطوب تا خشک ارتفاعات بوده، میانگین بارندگی سالیانه منطقه حدود ۴۵۰ میلی‌متر است.

زمین‌شناسی، فرسایش و ژئومورفولوژی: در جنوب حوضه، سازند کرج دارای گسترش قابل توجهی بوده، شیل‌ها با لایه‌بندی نازک، شکنندگی و تورق‌پذیری بالا و نفوذپذیری کم، موجب فرسایش‌پذیری زیاد و تولید واریزه فراوان می‌شود. سازندهای لالون، زاگون، جیرود، درود و شمشک در شمال حوضه رخنمون دارند. سنگ آهک یکی از سنگ‌های نفوذپذیر که در حوضه گسترش زیادی دارد و بیشتر مربوط به سازندهای میلا، جیرود، درود و روته می‌شود. سنگ‌های آذرآواری نیز در قسمت‌هایی از جنوب و شمال حوضه وجود دارند که عمدتاً شامل توف-توفیت‌ها، گدازه‌های آندزیتی و داسیتی، بازالت و آندزیت هستند.

رسوبات کواترنری به‌صورت پادگانه آبرفتی جوان

(مخروط واریزه‌ای) گاهی دیده می‌شوند. مهمترین گسل‌های منطقه شامل گسل مشاء- فشم و کندوان هستند. تأثیر نیروهای تکتونیک و پدیده هوازدهی موجب شده تا در پای بیشتر دامنه‌ها حجم قابل ملاحظه‌ای از مواد واریزه‌ای ملاحظه شود. تیپ غالب فرسایش، از نوع آبراهه‌ای-شیاری می‌باشد. انواع فرسایش توده‌ای مخصوصاً ریزش (سنگ و واریزه)، لغزش و جریان واریزه‌ای دامنه‌ای، بیشتر در سازندهای شمشک ملاحظه می‌شود.

الف) تعیین حوضه‌های مطالعاتی و ارزیابی میدانی رسوبات: در حوضه بالای سد کرج ۷۰ زیرحوضه فرعی با پراکنش مناسب جغرافیایی، اعمال شرایط طبیعی (عدم وجود هرگونه فعالیت‌های عمرانی در سطح حوضه)، دارا بودن سطح مقطع مناسب بستر آبراهه برای نمونه‌برداری و نیز با در نظر گرفتن شرایط زمین‌شناسی و تکتونیک نسبتاً همگن که در وقایع جریان‌های سیلابی ۲۸ تیر ماه ۱۳۹۴ فعال بودند، در نظر گرفته شد (شکل ۱).

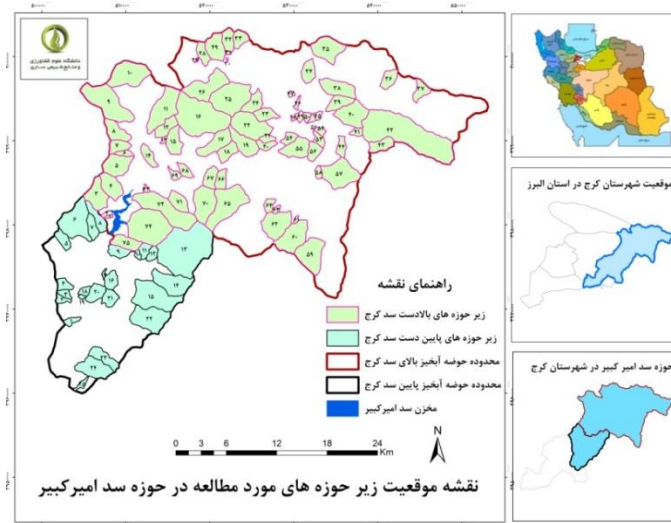
مختصات UTM محل نمونه‌برداری در خروجی زیرحوضه‌ها به‌منظور تعیین محدوده آبخیزها در نقشه مدل رقومی ارتفاعی^۱ ثبت و از طریق برنامه الحاقی Arc Hydro و نقشه DEM (۲۵×۲۵) و همچنین، به روش ترسیمی در نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ نقشه زیرحوضه‌ها تهیه شد. ضمن بازدیدهای صحرایی، خصوصیات ژئومورفیک شکلی و ساختاری رسوبات (ردیف یک تا چهار) مورد بررسی و امتیازبندی قرار گرفت. با انجام عملیات نمونه‌برداری و دانه‌بندی رسوبات، امتیاز شاخص‌های ریخت‌سنجی رسوبات (ردیف ۵) نیز تعیین و نسبت به تکمیل نهایی فرم ارزیابی برای هر زیرحوضه اقدام شد (جدول ۱).

روش تحقیق: روند نمای مراحل انجام پژوهش در شکل ۲ شامل دو مرحله توصیفی و تحلیلی ارائه شده است.

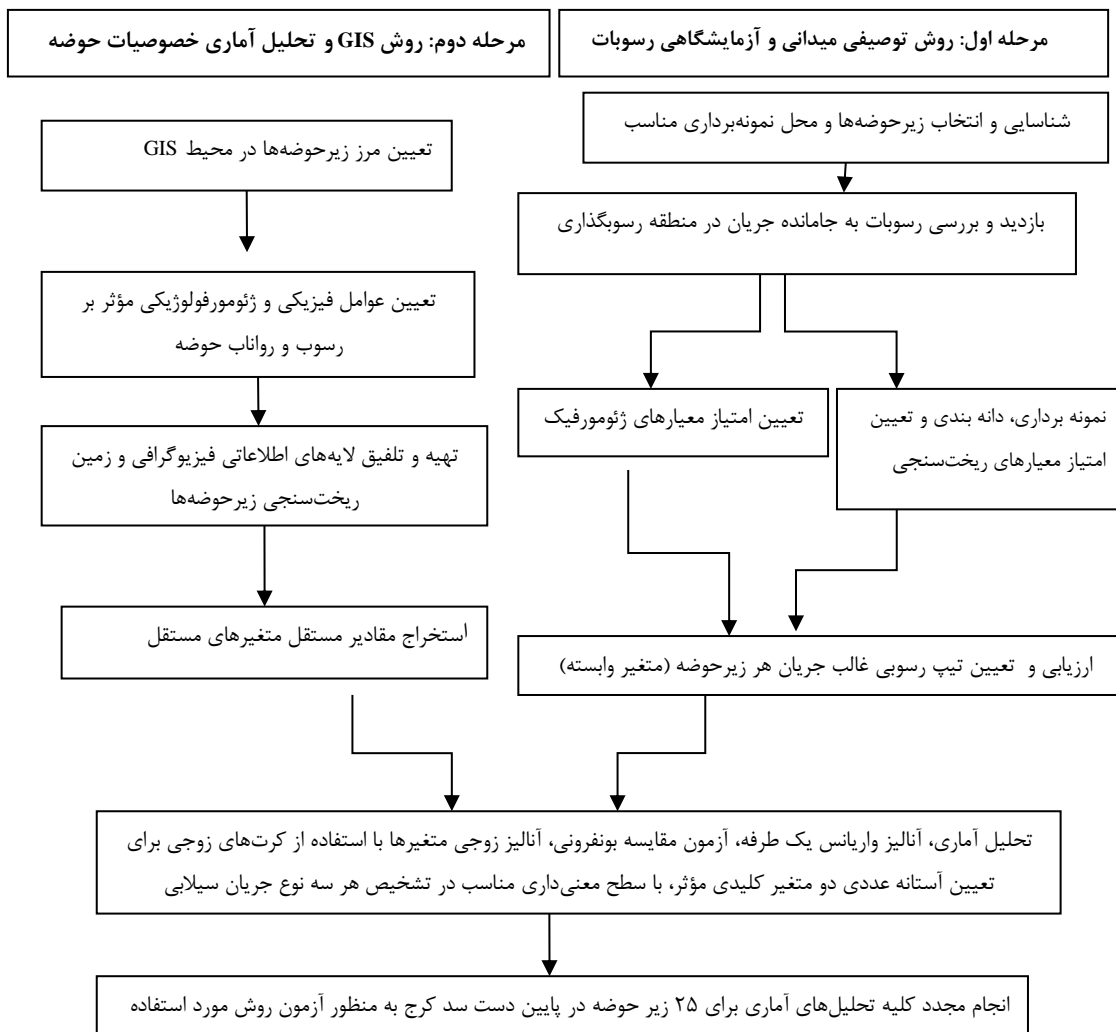
ب) نمونه‌برداری و تعیین شاخص‌های ریخت‌سنجی رسوبات: پس از فروکش جریان‌های سیلابی مورخه ۱۳۹۴/۰۴/۲۸ هم‌زمان با انجام عملیات

¹ DEM (Digital Elevation Model)

میدانی و ارزیابی معیارهای ژئومورفیک رسوبات در منطقه رسوب‌گذاری در بستر خروجی آبراهه با ثبت مختصات جغرافیایی محل، نمونه‌برداری رسوبات نیز انجام شد.



شکل ۱- موقعیت زیرحوضه‌های مطالعاتی، سد کرج، البرز، ایران



شکل ۲- نمودار جریان‌یابی تعیین شاخص‌های فیزیکی و ژئومورفولوژیکی مؤثر بر رخداد انواع جریان‌های سیلابی

جدول ۱- معیارهای ژئومورفیک و ریخت‌سنجی رسوبات انواع فرایندهای هیدروژئومورفیک مورد بررسی

ویژگی رسوبات	سیلاب معمولی	سیلاب واریزه‌ای	جریان واریزه‌ای
ساخت رسوبی	- لایه‌بندی افقی، مایل تا توده‌ای - انباشت فلسی شکل متوسط تا قوی - بریدگی و پرشدگی رسوبات - طبقه‌بندی نشده تا طبقه‌بندی شده	- لایه‌بندی ضعیف افقی تا توده‌ای - انباشت فلسی متوسط تا ضعیف - بدون بریدگی و پرشدگی رسوبات - طبقه‌بندی معمولی تا معکوس	- بدون لایه‌بندی - انباشت فلسی ضعیف تا هیچ - درجه‌بندی معکوس قاعده و - درجه‌بندی عادی در بالا
شکل ناهمواری رسوبات	- بار یا پشته رسوبی - مخروط افکنه‌های پایکوهی - صفحات رسوبی - مخروط کوچک در خروجی فرعی - توزیع بار رسوب عموماً در آبراهه	- بار یا پشته رسوبی - مخروط افکنه‌های پایکوهی - صفحات رسوبی - مخروط کوچک در خروجی فرعی - رسوبات در آبراهه و مخروط‌افکنه	- خاکریزهای حاشیه‌ای و موجی - پشته‌های سخت داخل بستر - در امتداد جریان رود - رسوبات تخته سنگی و چوبی
فرم و جهت یافتگی قطعات	- محور طولی ذرات درشت عمود بر جریان - دارای قطعات تخریبی کروی شکل	- تخته‌سنگ و قطعه سنگ‌های بزرگ عمود بر جریان، قطعه سنگ و قلوه- سنگ‌های کوچک، موازی جریان - فرم قطعات زاویه‌دار تا نیمه زاویه‌دار	- محور طولی ذرات، موازی با جهت جریان و یا تصادفاً مورب - عدم جهت یافتگی خاص - قطعات گوشه‌دار
مورفولوژی آبراهه	- نسبت عرض به عمق آبراهه زیاد (بیش از ۱۲) - فرم آبراهه در پایاب، مه آندری یا بریده بریده - بستر آبرفتی	- نسبت عرض به عمق آبراهه متوسط (۱۰-۱۲) - فرم آبراهه در پایاب پوشیده از سنگ و واریزه - بستر آبرفتی و سنگی	- نسبت عرض به عمق آبراهه، کم (دره باریک) - شکل ذوزنقه‌ای و U شکل - فرم آبراهه خطی یا موجی - کنش آبراهه تا سنگ بستر
معیارهای ریخت‌سنجی (آزمایشگاهی)	- جورشدگی خوب تا متوسط - ضریب تراسک ۲/۷-۱/۸ - ضریب فولک کمتر از ۰/۵ - چولگی جامع ۰/۱ تا ۰/۱- - کشیدگی کمتر از ۰/۹ - دامنه گسترده در بافت	- جورشدگی متوسط و ضعیف - ضریب تراسک ۳/۶-۲/۷ - ضریب فولک ۰/۵ تا یک - چولگی جامع ۰/۱ تا +۱ - کشیدگی ۱/۱-۱-۰/۹ - غالباً ماسه درشت	- جورشدگی ضعیف - ضریب تراسک ۱۲/۳-۳/۶ - ضریب فولک بیش از یک - چولگی جامع ۰/۱- تا ۰/۳- - کشیدگی بیشتر از ۱/۵ - دامنه بسیار گسترده بافت

منابع: Costa (۱۹۸۸)، Hunger و همکاران (۲۰۰۱)، Feiznia (۲۰۰۸) و Yamani و همکاران (۲۰۱۰)

رسوبی باشد. دانه‌بندی نمونه‌ها در دو مرحله صحرایی و آزمایشگاهی انجام شد. قطعات با قطر متوسط (b) بزرگ‌تر از ۳۲ میلی‌متر در صحرا به‌طور مستقیم با استفاده از یکی از ابزارهای خط‌کش، کولیس و یا گراولومتر Khaledi Darvishin (۱۳۸۳) در چهار طبقه قطری ۳۲ تا ۴۵، ۴۶ تا ۶۴، ۶۵ تا ۹۰ و ۹۱ تا ۱۲۸ میلی‌متر دسته‌بندی شد و هم‌زمان توزین مجموع چهار طبقه قطری نیز به‌وسیله ترازوی دیجیتالی انجام شد. ذرات رسوبی با قطر کوچک‌تر از ۳۲ میلی‌متر در ۹۵ بسته مجزا مربوط به ۷۰ زیرحوضه بالای سد و ۲۵ زیرحوضه پایین سد به وزن تقریبی ۲۰۰۰ کیلوگرم برای انجام دانه‌بندی به آزمایشگاه منتقل شد. مواد آلی نمونه رسوبات به‌وسیله آب اکسیژنه زدوده شده، در هوای آزاد و دمای اتاق،

بر اساس تجارب Mosley و Tindal (۱۹۸۵)، Fripp و Dipals (۱۹۹۳) و Sadeghi و همکاران (۲۰۰۷) به روش ترکیبی، ابتدا از رسوبات سطحی مقطع تعیین شده، در امتداد ترانسکت (نوار خطی) به عرض رودخانه به پهنای یک متر و عمق حدود ۱۵ سانتی‌متر، بسته به عرض رودخانه، بین چهار تا شش پلات نمونه‌برداری به ابعاد یک در یک متر، برداشت شده و سپس، نمونه‌های برداشت شده از پلات‌ها با یکدیگر مخلوط و مقدار رسوب مورد نیاز برای انتقال به آزمایشگاه از رسوبات مخلوط شده برداشت شد. بر اساس نظر Tindale و همکاران (۱۹۸۵)، وزن بزرگ‌ترین ذره رسوبی در داخل نمونه بیش از پنج درصد وزن کل نمونه نباشد، به‌عبارتی میزان برداشت رسوب بیشینه باید ۲۰ برابر وزن بزرگ‌ترین ذره

ریخت‌سنجی رسوبات مانند جورشدگی (یک‌نواختی)، چولگی (کجی) و کشیدگی (پخی) از نرم‌افزار ماکروی گرادای‌استات (GRADISTAT) Blott و Pye (۲۰۰۱) و روش فولک استفاده شد که تعاریف کلی این شاخص‌ها توصیف می‌شود.

خشک و کلوخه‌های آن را با چکش پلاستیکی خرد کرده، دانه‌بندی آن‌ها بر اساس استاندارد بین‌المللی ASTM به روش الک خشک و به تفکیک ابعاد دامنه قطری دو الک متوالی انجام شد (شکل ۴). به‌منظور افزایش سرعت و دقت محاسبه شاخص‌های



شکل ۳- نمایی از نهشته‌های رسوبات جریان‌های سیلابی، الف) سیلاب عادی، ب) سیلاب واریزه‌ای و ج) جریان واریزه‌ای



شکل ۴- الف) عملیات دانه‌بندی رسوبات جریان‌های سیلابی در آزمایشگاه و ب) در صحرا

منحنی رسوب به بررسی نظم در دو طرف مدیان (میانه) ذرات و تمایل منحنی دانه‌بندی رسوب به سمت ذرات ریز یا درشت‌دانه می‌پردازد. در منحنی‌های متقارن مقدار کج‌شدگی صفر است. منحنی بعضی رسوبات به سمت چپ و مواد ریزدانه متمایل می‌شود که در این صورت میزان کج‌شدگی مثبت می‌شود و نشان‌دهنده رسوبگذاری در محیط آرام است. منحنی بعضی دیگر از رسوبات به سمت راست و مواد درشت‌دانه متمایل می‌شود که در این صورت میزان کج‌شدگی منفی و نشان‌دهنده رسوبگذاری در محیط پر انرژی بوده است (Feiznia, ۲۰۰۷).

ج) تلفیق معیارهای صحرایی و آزمایشگاهی و ارزیابی رسوبات: در این پژوهش، از جمع‌بندی امتیازات پنج ردیف معیارهای ژئومورفیک میدانی و ریخت‌سنجی آزمایشگاهی رسوبات در فرم‌های ارزیابی

ضریب جورشدگی رسوبات: از مهمترین خصوصیات خاک و رسوب است که مقادیر آن در رسوبات هر جریان تعیین‌کننده رژیم رسوبی آن جریان است. این موضوع توسط Costa و Fleisher (۱۹۸۴) و Malt (۲۰۰۴) مورد تأیید قرار گرفته است. به‌طورکلی، رسوبات جریان غلیظ دارای جورشدگی ضعیف تا بسیار ضعیف بوده که به‌دلیل توان فیزیکی رودخانه در حمل انواع ذرات رسوبی از ریز تا درشت بوده است. در این مطالعه، از ضریب جورشدگی فولک به‌علت دقت بالای آن در بررسی حدود ۹۰ درصد اندازه ذرات در منحنی تجمعی استفاده شده است (جدول ۴).

شاخص کشیدگی: شامل نوک‌تیزی یا بلندی و پخی یا پهن‌شدگی منحنی دانه‌بندی یا توزیع فراوانی ذرات است و نشان می‌دهد که نقطه اوج، چه درصدی از فراوانی ذرات را شامل می‌شود (Blott و Pye, ۲۰۰۱).

شاخص ضریب تقارن یا چولگی: کج‌شدگی در

خاصی از جریان مشخص باشند و یا به علت صعب‌العبور بودن، شیب فراوان و تراکم پوشش گیاهی امکان دسترسی به آن‌ها وجود نداشته باشد، علامت (N/A) به مفهوم نامشخص و امتیاز صفر (۰) به آن ردیف خاص تعلق می‌گیرد.

جداگانه به تفکیک سه نوع جریان مشاهده شده در هر زیرحوضه و بر اساس رابطه (۴) تیپ غالب جریان هر زیرحوضه بر اساس بالاترین مجموع درصد فراوانی نسبی امتیازات هر یک از جریان‌ها تعیین شد (جدول ۲). در آبراهه‌هایی که یک ردیف فاقد معیار و علائم

$$\text{درصد فراوانی نسبی معیارهای مشاهده شده هر جریان} = \frac{\text{تعداد معیار مشاهده شده}}{\text{مجموع کل معیارها}} \times 100 \quad (۴)$$

جدول ۲- نمونه فرم ارزیابی و محاسبه امتیاز معیارهای رسوب‌شناسی هر سه نوع جریان در یک حوزه آبخیز نمونه (منبع: Davies و Welsh، ۲۰۱۱)

ردیف	معیارهای مشاهداتی و آزمایشگاهی رسوب‌شناسی	سیلاب عادی	سیلاب واریزه	جریان واریزه
۱	لایه‌بندی ضعیف و انباشت فلسی قطعه سنگ‌ها	بلی	بلی	خیر
۲	پشته رسوبی بار	N/A	N/A	N/A
۳	قطعات درشت نیمه گوشه‌دار و عمود بر جریان	بلی	بلی	خیر
۴	نسبت عرض به عمق آبراهه بیش از ۱۲ و بستر آبرفتی	بلی	خیر	خیر
۵	جورشدهگی ضعیف و قطعات درشت در زمینه ریزدانه (آزمایشگاهی)	خیر	خیر	بلی
	نسبت فراوان معیارهای مشاهداتی	۳ : ۵	۲ : ۵	۱ : ۵
	درصد فراوانی نسبی معیارهای موجود	۶۰	۴۰	۲۰

نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ تهیه و در برنامه الحاقی ArcHydro با ثبت مختصات UTM نقاط خروجی حوضه‌ها در محل نمونه‌برداری رسوبات، نقشه زیرحوضه‌های مطالعاتی تهیه و با روش ترسیمی اولیه کنترل شد (شکل‌های ۱ و ۵).

استخراج و پردازش داده‌های فیزیکی از نقشه DEM: پارامترهای ژئومورفومتری^۱ یا مورفومتری شامل عوامل هندسی و فیزیوگرافی حوزه آبخیز هستند که برای هر حوضه به نسبت ثابت بوده، بیان‌گر وضع هندسی و ظاهری حوضه و معرف رفتار هیدرولوژیک، وضعیت رسوب‌دهی و فرسایش حوضه هستند. این پارامترها به چهار گروه خطی^۲، سطحی^۳، برجستگی^۴ و شکلی^۵ قابل تفکیک می‌باشند و به صورت نرم‌افزاری در محیط ArcGIS و در برنامه الحاقی ArcHydro با استفاده از نقشه مدل رقومی ارتفاعی قابل برآورد و محاسبه هستند. در این مطالعه، ۳۲ عامل کمی مورفومتری مؤثر در میزان رواناب و

در جدول ۲، نوع جریان سیلابی غالب زیرحوضه مطالعاتی، (سیلاب) تعیین شد. به این ترتیب، نوع جریان سیلابی کلیه زیرحوضه‌های مطالعاتی تعیین و برای بررسی رابطه آماری آن‌ها با متغیرهای فیزیکی و ژئومورفولوژیکی حوضه‌ها از روش تجزیه و تحلیل آماری به شرح زیر استفاده شد.

تجزیه و تحلیل عوامل فیزیکی و ژئومورفولوژیکی حوضه‌های مطالعاتی و جریان‌های سیلابی مشاهداتی: به منظور دستیابی به مقادیر کمی ویژگی‌های فیزیکی و ژئومورفولوژیکی زیرحوضه‌های مورد مطالعه و انجام تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، ابتدا نقشه‌های مربوطه تهیه و سپس، داده‌های مورد نیاز استخراج شد.

نقشه مدل رقومی ارتفاعی (DEM) و نقشه زیرحوضه‌های مطالعاتی: با استفاده از نرم‌افزار AutoCAD خطاهای موجود در موزاییک ۱۴ برگ نقشه رقومی توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ منطقه تصحیح شد و مرز زیرحوضه‌ها به روش ترسیمی با دقت فراوان و استفاده از برنامه الحاقی CAD Earth تعیین شد. همچنین، در محیط نرم‌افزاری ArcGIS نیز ابتدا نقشه مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با اندازه سلولی ۲۵×۲۵ متر و دقت ارتفاعی عمودی ۱۰ متر با استفاده از

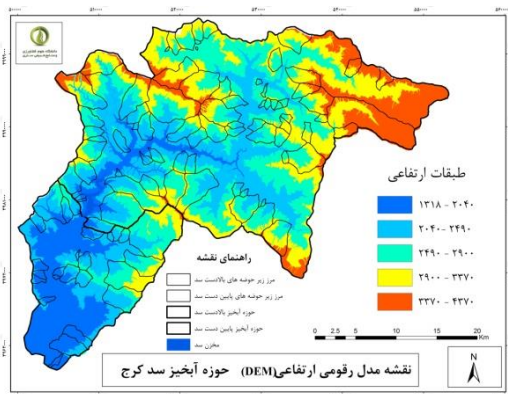
¹ Geomorphometry

² Linear

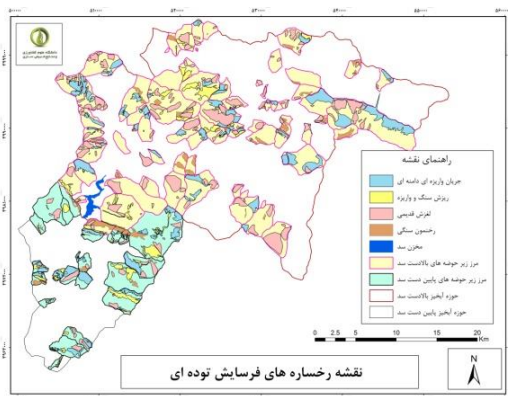
³ Areal

⁴ Relief

⁵ Shape



شکل ۵- نقشه مدل رقومی ارتفاعی (DEM)



شکل ۶- نقشه رخساره‌های فرسایش توده‌ای

استخراج و پردازش داده‌های زمین

ریخت‌شناسی: پنج پارامتر زمین ریخت‌شناسی^۶ که از تلفیق لایه‌های مختلف انواع حرکات توده‌ای با نقشه زیرحوضه‌ها در محیط GIS به دست می‌آید، در جدول ۳ ملاحظه می‌شود.

با تشکیل بانک اطلاعاتی در محیط Excel و پردازش داده‌ها و محاسبه برخی پارامترها با استفاده از روابط مختلف فیزیوگرافی حوضه‌ها، بسته آماری متغیرهای مستقل (مورفومتری و ژئومورفولوژیکی) و متغیرهای وابسته (سه نوع جریان)، آماده‌سازی و برای تجزیه و تحلیل به محیط آماری SPSS منتقل شد.

با انجام آزمون تحلیل واریانس یک طرفه^۷ و آزمون مقایسه چندگانه تعقیبی بونفرونی^۸ و استفاده از نمودارهای پراکنش زوج متغیری، شاخص‌های مؤثر در تعیین نوع جریان‌های سیلابی انتخاب شدند.

رسوب حوضه و روابط محاسباتی آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است.

نقشه رخساره‌های فرسایش توده‌ای و رخساره توده سنگی: ابتدا، نقشه پراکنش حرکات توده‌ای سال ۱۳۸۴ مربوط به گروه زمین‌لغزش معاونت آبخیزداری سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور به‌روزرسانی شد. به این صورت که اطلاعات مکانی پهنه‌های لغزشی، ریزشی و جریانی بعد از سال ۱۳۸۴ و نیز مقارن سال ۱۳۹۴ که در عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای Google earth قابل مشاهده و تشخیص بود، به‌صورت دقیق ثبت و محدوده‌های آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار Global mapper 12 تبدیل به فرمت وکتوری و در محیط GIS جانمایی شد.

طی عملیات میدانی محل دقیق گسیختگی‌ها و مختصات جغرافیایی محدوده‌ها، به‌وسیله دستگاه GPS ثبت و کنترل شده و مکان‌های تعیین شده قبلی با وضعیت موجود ناپایداری‌ها تطبیق داده شد. نتایج به‌صورت نقشه رخساره‌های فرسایش دامنه‌ای شامل جریان‌ها، ریزش‌ها، لغزش‌ها، مجموع حرکات توده‌ای و رخساره توده سنگی در شکل ۶ ارائه شده است. لغزش^۱ نوعی حرکت توده‌ای نسبتاً خشک یا مرطوب به‌صورت جابه‌جایی دامنه بر روی سطح گسیختگی می‌باشد. ریزش^۲ نوعی حرکت توده‌ای شامل فرایند سقوط و جابه‌جایی عناصر بی‌شکل واریزه سنگی و خاکی روی شیب است. جریان واریزه‌ای دامنه‌ای^۳ نوعی حرکت توده‌ای است که در اثر اشباع خاک دامنه به‌وجود آمده، بر روی شیب به حرکت در می‌آید و در مسیر آبراهه‌ها به جریان واریزه‌ای کانالی^۴ تبدیل می‌شود.

مجموع ناپایداری‌ها شامل تلفیق سه نوع حرکت توده‌ای فوق می‌شود. رخساره توده سنگی^۵ مجموع سطوح صخره سنگی و رخنمون سنگی حوضه را شامل می‌شود.

² Slide

³ Fall

⁴ Slope debris flow

⁵ Channelized debris flow

⁵ Bed rock

⁶ Geomorphologic parameters

⁷ ANOVA - One-way analysis of variance

⁸ Bonferroni Multiple Comparisons Post Hoc.

جدول ۳- اطلاعات توصیفی پارامترهای ژئومورفومتری و ژئومورفولوژی حوضه

ردیف	ویژگی‌های حوضه	واحد	منابع	رابطه
۱	** محیط حوضه (p)	Km	شیوم (۱۹۵۶)	Software Analysis GIS
۲	** طول حوضه (L _b)	Km	شیوم (۱۹۵۶)	Software Analysis GIS
۳	** تعداد آبراهه (Nu)	UL	هورتن (۱۹۴۵)	$N_u = N_1 + N_2 + \dots + N_n$
۴	** طول آبراهه‌ها (L _u)	Km	استراهلر (۱۹۶۴)	$L_u = L_1 + L_2 + \dots + L_n$
۵	** انشعاب‌پذیری (Rb _m)	UL	استراهلر (۱۹۵۳)	$R_{b_m} = N_u / Nu_{+1}$
۶	** طول آبراهه اصلی (L _m)	Km	-	Software Analysis GIS
۷	** ضریب ذخیره‌سازی (ρ)	UL	هورتن (۱۹۴۵)	$\rho = L_{ur} / R_b$
۸	** نسبت میانگین آبراهه (L _{sm})	UL	هورتن (۱۹۴۵)	$L_{sm} = L_u / N_u$
۹	** سطح حوضه (A)	Km ²	شیوم (۱۹۵۶)	Software Analysis GIS
۱۰	** تراکم زهکشی (D _d)	Km / Km ²	هورتن (۱۹۴۵)	$D_d = L_u / A$
۱۱	** شدت زهکشی (D _i)	UL	فانیران (۱۹۶۸)	$D_i = F_s / D_d$
۱۲	** فراوانی آبراهه (F _s)	UL	هورتن (۱۹۴۵)	$F_s = \sum N_u / A$
۱۳	** نسبت بافت زهکشی (R _t)	UL	شیوم (۱۹۵۶)	$R_t = N_u / P$
۱۴	** طول جریان سطحی (L _g)	Km	هورتن (۱۹۴۵)	$L_g = A / 2 * L_u$
۱۵	** عرض میانگین حوضه (W _b)	Km	هورتن (۱۹۳۲)	$W_b = A / L_b$
۱۶	** عامل نفوذپذیری (I _f)	UL	فانیران (۱۹۶۸)	$I_f = F_s * D$
۱۷	** نسبت گردی (R _c)	UL	استراهلر (۱۹۶۴)	$R_c = 12.57 * A / P^2$
۱۸	** عامل فرم (F _f)	UL	هورتن (۱۹۴۵)	$F_f = A / L_b^2$
۱۹	** نسبت طولی (R _e)	UL	شیوم (۱۹۵۶)	$R_e = (2 / L_b) * (A / \pi)^{0.5}$
۲۰	** نسبت فیت نس (R _f)	UL	ملتون (۱۹۵۷)	$R_f = C_1 / P$
۲۱	** ناهمواری کلی (R)	Km	استراهلر (۱۹۵۲)	$R = Z - z$
۲۲	** نسبت ناهمواری (Rh _L)	UL	شیوم (۱۹۵۶)	$Rh_L = R / L_b$
۲۳	** ناهمواری نسبی (R _{hp})	UL	ملتون (۱۹۵۷)	$Rhp = H * 100 / P$
۲۴	** عدد ناهمواری (R _n)	UL	پاتون (۱۹۷۶)	$R_n = D_d * (R / 1000)$
۲۵	** ضریب ملتون (MR _n)	UL	ملتون (۱۹۶۵)	$MR_n = H / A^{0.5}$
۲۶	** انتگرال هیپسومتريک (Hi)	%	استراهلر (۱۹۵۲)	Hypsom Curve (h/h & a/A)
۲۷	** گرادبان آبخیز (R _g)	UL	اسریدوی (۲۰۰۴)	$R_g = (H - h) / L_b$
۲۸	** ارتفاع متوسط (H _{Mean})	%	کورلی (۱۹۷۹)	Software Analysis GIS
۲۹	** سطح حوضه با شیب معین	%	ویلفورد (۲۰۰۴)	Slopes > G30 ⁰
۳۰	** سطح حوضه با شیب معین	%	ویلفورد (۲۰۰۴)	Slopes > G35 ⁰
۳۱	** سطح حوضه با شیب معین	%	ویلفورد (۲۰۰۴)	Slopes > G40 ⁰
۳۲	** سطح حوضه با شیب معین	%	شیوم (۱۹۵۶)	G30 ⁰ < Slopes < G40 ⁰
۳۳	** سطوح ناپایداری کل	%	تیرانتی (۲۰۱۵)	Mass movements
۳۴	** سطوح ناپایدار لغزشی	%	تیرانتی (۲۰۱۵)	Slides
۳۵	** سطوح ناپایدار ریزشی	%	تیرانتی (۲۰۱۵)	Falls
۳۶	** سطوح ناپایدار جریانی	%	تیرانتی (۲۰۱۵)	Flows
۳۷	** سطوح توده سنگی	%	تیرانتی (۲۰۱۵)	Bed Rock

* عوامل منتخب در آزمون تحلیل واریانس یک مرحله‌ای و ** عوامل منتخب در آزمون مقایسه چندگانه بونفرونی

نتایج و بحث

نتایج توصیفی ارزیابی میدانی و آزمایشگاهی

رسوب‌شناسی: هر چند اشکال مختلف رسوب‌گذاری و خصوصیات رسوب‌شناسی انواع جریان‌های سیلابی

در بستر خروجی حوضه‌ها متفاوت بوده، شواهد رسوب‌شناسی کمک می‌کند تا قضاوت بهتری نسبت به جریان‌های مختلف سیلابی وجود داشته باشد. نتایج طبقه‌بندی صحرایی جریان‌های سیلابی بر اساس

نشان‌دهنده رسوبگذاری در محیط نسبتاً آرام بوده است و میانگین مقادیر چولگی برای نمونه‌های رسوبات زیرحوضه‌های گروه سیلاب معمولی ۰/۰۹ با منحنی نسبتاً متقارن و نشان از محیط رسوبی آرام و جورشدگی کامل ذرات رسوبات در نمودار دانه‌بندی است. میانگین مقادیر کشیدگی نمودار دانه‌بندی، در گروه جریان‌های واریزه‌ای ۲/۳۳ نشان از کشیدگی زیاد^۱ داشته، میانگین مقادیر کشیدگی منحنی دانه‌بندی در گروه سیلاب واریزه‌ای ۱/۳۵ با کشیدگی متوسط^۲ و برای گروه سیلاب‌های عادی ۰/۸۵ با پهن‌شدگی زیاد^۳ داشته است. روند کلی کشیدگی با افزایش جورشدگی (از گروه جریان واریزه‌ای به سمت سیلاب عادی) کاهش یافته است.

نتایج طبقه‌بندی میدانی و آزمایشگاهی رسوبات

جریان سیلابی زیرحوضه‌ها: طبق فرم‌های ارزیابی رسوبات جریان غالب هر زیرحوضه با بیشینه امتیازات معیارهای پنج‌گانه رسوب‌شناسی مشخص شد. از ۷۰ زیرحوضه بالای سد ۳۰ زیرحوضه با جریان واریزه‌ای، ۱۶ زیرحوضه با سیلاب واریزه‌ای و ۲۴ زیرحوضه با جریان سیلاب عادی مواجه شده بودند. همچنین، در پایین سد از مجموع ۲۵ زیرحوضه ۱۱ مورد جریان واریزه‌ای، شش مورد سیلاب واریزه‌ای و هشت مورد سیلابی عادی بوده‌اند (جدول ۷).

نتایج تجزیه و تحلیل آماری ویژگی‌های حوضه:

بر اساس نتایج آزمون تحلیل واریانس یک مرحله‌ای، از بین ۳۷ پارامتر مستقل مورفومتری و ژئومورفولوژیکی، میانگین مقادیر ۱۷ پارامتر مورفومتری حوضه‌ها که در جدول ۳ با علامت تک ستاره مشخص شده‌اند، بر اساس سطح معنی‌داری مناسب (کمتر از پنج درصد)، در وقوع دست‌کم یکی از انواع گروه‌های جریان نقش داشته‌اند و بقیه ۲۰ عامل از مدل خارج شدند.

نتایج آزمون مقایسه چندگانه تعقیبی بونفرونی نشان داده است، در مقایسه دو به دو گروه‌های سه گانه جریان از بین ۱۷ متغیری که در مرحله قبل دست‌کم در یک گروه جریان دارای سطح معنی‌داری

شواهد رسوبی در مناطق جنگلی، بیشه‌زار و حوضه‌های دارای سیلاب مجدد، به دلایل زیر، دشوار و چالش برانگیز است. جهت‌گیری قطعه‌سنگ‌ها تحت تأثیر آشفتگی در اطراف ساقه درختان و درختچه‌ها و واریزه‌های چوبی به علت تغییر مسیر آبراهه تغییر می‌کند. همچنین، تأخیر در بازدید میدانی و بروز سیلاب بعدی می‌تواند علائم مشخصه رسوبات را تغییر دهد، بنابراین، برای دستیابی به نتایج مطلوب، ارزیابی میدانی رسوبات باید همراه با مطالعات رسوب‌شناسی باشد (Wilford و همکاران، ۲۰۰۴).

در این تحقیق، علاوه بر شاخص جورشدگی که در مطالعات Costa (۱۹۸۸)، Hungr و همکاران (۲۰۰۱)، Wilford و همکاران (۲۰۰۴)، Arattano و Franzl و (۲۰۰۴)، Welsh و Davies (۲۰۱۰)، Yamani و همکاران (۲۰۱۰) و Feiznia (۲۰۰۸) برای طبقه‌بندی حوضه‌ها استفاده شده است، از معیارهای ضریب تقارن و کشیدگی نیز استفاده شده است که نتایج حاصله با نتایج پژوهش Najafi Nejad و همکاران (۲۰۰۵) و (۲۰۰۷) و Mohseni و Khodabakhsh (۱۹۹۹) کاملاً مطابقت داشته است. میانگین مقادیر ضریب جورشدگی فولک محاسبه شده برای رسوبات حوضه‌های جریان واریزه‌ای ۲/۸۵ بوده که مطابق جدول استاندارد فولک نشان از جورشدگی بسیار بد و برای حوضه‌های سیلاب واریزه‌ای ۱/۸ با جورشدگی بد و برای حوضه‌های سیلاب عادی ۰/۷ بوده که بیان‌گر جورشدگی خوب تا متوسط می‌باشد که با نتایج مطالعات Najafi Nejad و همکاران (۲۰۰۵) و (۲۰۰۷)، Costa و Chart (۱۹۸۱) و Mohseni و Khodabakhsh (۱۹۹۹) هم‌سویی دارد و نشان از جورشدگی بد و بسیار بد ذرات رسوب سیلاب واریزه‌ای و جریان واریزه‌ای و تفاوت آشکار آن‌ها با سیلاب عادی بوده است. در این تحقیق، میانگین چولگی نمونه‌های رسوبات زیرحوضه‌های گروه جریان واریزه‌ای منفی با کجی بسیار شدید به سمت راست و ذرات درشت‌دانه ۱/۳۱- نشان‌دهنده رسوبگذاری در محیط پر انرژی و جورشدگی بیشتر ذرات ریزدانه در منحنی نمودار دانه‌بندی است. میانگین چولگی رسوبات زیرحوضه‌های گروه سیلاب واریزه‌ای مثبت با کجی شدید به سمت چپ و ذرات ریزدانه ۱/۵۸ بوده که

¹ Kurtosis

² Msokurtic

³ Platykurtic

می‌شود. نتایج آزمون بونفرونی نشان داد، دامنه معنی‌داری میانگین پارامترهای طول حوضه، صفر تا ۰/۰۴۵، عرض میانگین حوضه صفر تا ۰/۰۲۱، طول آبراهه اصلی صفر تا ۰/۰۳۶ و محیط حوضه صفر تا ۰/۰۳۷ بوده‌اند. لذا، این عوامل در مقایسه دو به دو جریان‌ها معنی‌دار و قابلیت ورود به مدل را نشان دادند و نیز شاخص‌های پراکنندگی آن‌ها در جدول ۵ نشان داده شده است.

مناسبی بودند، چهار متغیر مورفومتری طول حوضه، عرض میانگین حوضه، طول آبراهه اصلی و محیط حوضه که در جدول ۳، با علامت دو ستاره مشخص شده‌اند، هم‌زمان در هر سه نوع جریان، دارای تفاوت‌های آماری معنی‌دار بودند که با روش Milliken و Johnson (۱۹۹۲) و Wilford و همکاران (۲۰۰۴) مطابقت دارد. میزان تفاوت معنی‌داری قابل قبول برای انتخاب پارامترهای مستقل به مقدار شاخص P-value وابسته می‌باشد و مقادیر کمتر از ۰/۰۵ را شامل

جدول ۴- میانگین متغیرهای کلیدی ریخت‌سنجی رسوبات زیرحوضه‌های مطالعاتی

ردیف	گروه جریان	ضریب جورشدگی فولک	ضریب چولگی	ضریب کشیدگی
۱	سیلاب عادی	۰/۷	۰/۰۹	۰/۸۵
۲	سیلاب واریزه‌ای	۱/۸	۱/۵۸	۱/۳۵
۳	جریان واریزه‌ای	۲/۸۵	-۱/۳۱	۲/۳۳

جدول ۵- عوامل انتخاب شده با استفاده از آزمون آماری تحلیل واریانس یک مرحله‌ای و آزمون مقایسه چندگانه بونفرونی

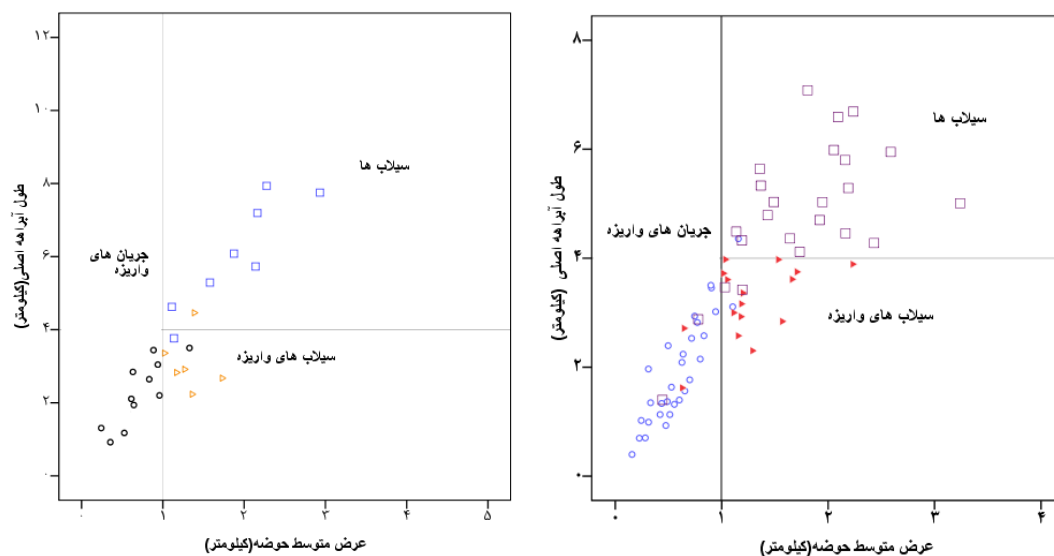
پارامترهای انتخاب شده (km)	شاخص پراکنندگی	جریان واریزه‌ای	سیلاب واریزه‌ای	سیلاب عادی
	میانگین	۵/۶۲	۱/۰۹۱	۸/۲۲
محیط حوضه (p)	انحراف معیار	۳/۵۱	۳/۰۸	۳/۵۱
دامنه		۱/۸۱ - ۱۷/۵۹	۴/۳۳ - ۱۵/۸۰	۱/۰۹ - ۱۵/۸۲
	میانگین	۲/۱۷	۳/۹۲	۳
طول حوضه (L_b)	انحراف معیار	۱/۲۳	۱/۰۹	۱/۲۳
دامنه		۰/۷۵ - ۶/۱۴	۱/۵۰ - ۶/۳۶	۰/۴۷ - ۴/۹۶
	میانگین	۲/۲۷	۴/۴۳	۳/۳۱
طول آبراهه اصلی (L_m)	انحراف معیار	۱/۴۲	۱/۳۲	۱/۴۷
دامنه		۰/۶۹۷ - ۶/۶۹	۱/۶۲۱ - ۷/۰۸	۰/۳۹۸ - ۶/۵۹
	میانگین	۰/۷۲۵	۱/۶۶	۱/۱۸
عرض میانگین حوضه (W_b)	انحراف معیار	۰/۴۹۹	۰/۶۹۳	۰/۵۳۴
دامنه		۰/۲۲۶ - ۲/۲۳	۰/۶۲۹ - ۳/۲۴	۰/۱۵۷ - ۲/۲۳

و افقی با روش بصری انجام شد. نتایج بیان‌گر این بود که نمودار زوجی طول آبراهه اصلی و میانگین عرض حوضه، بر اساس کمینه مجموع تعداد خطاهای مشاهداتی در طبقه‌بندی بصری سه نوع جریان (مجموعاً هشت مورد) و نیز کمینه مجموع خطاهای مشاهداتی مربوط به جریان‌های واریزه‌ای (به‌دلیل اهمیت ویژه و سطح خطر بالا) در طبقات سه‌گانه

برای دستیابی به دو پارامتر کلیدی مناسب از بین چهار پارامتر مورفومتری انتخاب شده و مقادیر آستانه هرکدام از آن‌ها از روش نمودارهای پراکنش نقطه‌ای زوج متغیری (Scatter plot) بهره‌گیری شد. مقایسه دو به دو عوامل در شش نمودار (کرت) جداگانه و تعیین محدوده طبقات انواع جریان‌های سیلابی مشاهداتی با نمادهای نمایشی، بین محورهای عمودی

بیشتر از چهار کیلومتر دارای پتانسیل وقوع سیلاب عادی هستند (جدول ۶). یکی از دلایل بروز سیلاب‌های غلیظ، وجود دامنه‌ها و آبراهه‌های پرشیب در حوضه‌های نسبتاً کوتاه در بالادست بوده، با طولانی شدن آبراهه‌ها مقادیر فراوانی از رسوبات در بازه‌های میانی آبراهه تجمع پیدا کرده و جریان غالب حوضه در پایین دست، سیلاب عادی می‌باشد.

جریان‌های سیلابی (مجموعاً دو مورد) به‌عنوان نمودار شاخص انتخاب شد. بررسی مقادیر آستانه عددی اجزاء پلات زوجی انتخاب شده نشان داد که حوضه‌های با طول آبراهه اصلی کمتر از چهار کیلومتر در صورتی که عرض میانگین حوضه‌ها کمتر از یک کیلومتر باشد، مستعد جریان واریزه‌ای و اگر عرض میانگین حوضه بیش‌تر از یک کیلومتر باشد، مستعد رخداد سیلاب واریزه‌ای هستند. سایر حوضه‌ها با طول آبراهه اصلی



شکل ۷- نمودار پراکنش نقطه‌ای (Scatter plot) دو متغیری شاخص برای تفکیک سه نوع جریان مشاهداتی در بالای سد کرج (راست) و پایین سد کرج (چپ). خطوط موجود محدوده آستانه مناسب برای تفکیک جریان‌های مختلف با کمینه خطا است (طبق جدول ۶)

مطالعاتی پیشین، ضریب ملتون به‌عنوان یکی از پارامترهای مورفومتری مهم برای تمایز و تفکیک نوع جریان حوضه‌ها مطرح بوده است. Jackson و همکاران (۱۹۸۷) نشان دادند، مقدار ضریب ملتون حوضه‌های سیلابی کمتر از $0/3$ و مقدار ضریب ملتون حوضه‌های دارای جریان واریزه‌ای بیشتر از $0/3$ بوده، سپس، Bowis و Jakob (۱۹۹۹) با کمی تغییر، ضریب ملتون $0/6$ را برای وقوع جریان واریزه‌ای حوضه‌ها مناسب دانستند و محدوده طبقات تعیین‌شده در نمودار مطالعاتی آن‌ها به‌طور مناسبی با مقادیر ملتون به دو طبقه جریان واریزه‌ای و سیلاب عادی تفکیک شده است. Wilford و همکاران (۲۰۰۴) با ترکیب زوجی مقادیر معین دو عامل ضریب ملتون و طول حوضه سعی بر تفکیک حوضه‌های جریان واریزه‌ای، سیلاب واریزه‌ای و

ملاک انتخاب مناسب‌ترین پلات (کرت) زوجی (طول آبراهه اصلی و عرض میانگین حوضه) تابع معیارهای کلیدی زیر بوده‌اند:

پلات شاخص دارای کمینه مجموع تعداد نقاط طبقه‌بندی شده ناصحیح بین همه پلات‌ها باشد، کمینه مجموع تعداد فرایند جریان واریزه‌ای ناصحیح در تمام پلات‌ها وجود داشته باشد، ترکیب آن‌ها نسبت به نمودارهای دیگر بیشترین تعداد حوضه‌ها را به‌طور صحیح طبقه‌بندی کند و بررسی و تعیین عوامل آن‌ها نسبتاً ساده باشد.

مقایسه نتایج طبقه‌بندی جریان‌های مشاهداتی به روش میدانی و روش مورفومتری (با استفاده از نمودار پراکنش طول آبراهه اصلی و عرض میانگین حوضه) به تفکیک زیرحوضه‌های بالای سد و پایین سد در جدول ۷ خلاصه شده است. طبق سوابق

کیلومتر) را مستعد بروز سیلاب واریزه‌ای و حوضه‌های با ضریب ملتون بیشتر از ۰/۶ (با طول حوضه کمتر از ۲/۷ کیلومتر) را جریان واریزه‌ای معرفی کردند.

سیلاب عادی داشتند، به این ترتیب که حوضه‌های با ضریب ملتون کمتر از ۰/۳ را دارای سیلاب معمولی، حوضه‌های با ضریب ملتون بین ۰/۳ تا ۰/۶ یا بیشتر از ۰/۶ (با طول حوضه بیش از ۲/۷

جدول ۶- مقادیر آستانه عددی زوج متغیرها بر اساس نمودارهای شش‌گانه پراکنش نقطه‌ای

مجموع طبقه‌بندی‌های ناصحیح	فرایندهای هیدروژئومورفیک مشاهده شده			ترکیب زوجی متغیرها
	جریان واریزه‌ای	سیلاب واریزه‌ای	سیلاب عادی	
مجموع خطاهای طبقه‌بندی: ۸	$W_b < 1$	$W_b > 1$	-	میانگین عرض حوضه (W_b)
	$L_m < 4$	$L_m < 4$	$L_m > 4$	طول آبراهه اصلی (L_m)
مجموع خطاهای طبقه‌بندی: ۱۰	$W_b < 1$	$W_b < 1$	$W_b < 1$	میانگین عرض حوضه
		$L_b < 3/8$	$L_b > 3/8$	طول حوضه (L_b)
مجموع خطاهای طبقه‌بندی: ۱۱	$W_b < 1$	$W_b > 1$	$W_b > 1$	میانگین عرض حوضه
	-	$P < 1.0$	$P > 1.0$	محیط حوضه (p)
مجموع خطاهای طبقه‌بندی: ۱۷	$L_m < 1$	$P > 1.0$	$P < 1.0$	محیط حوضه
	-	$L_m > 3$	$L_m > 3$	طول آبراهه اصلی
مجموع خطاهای طبقه‌بندی: ۱۲	$L_m < 4$	$L_m < 4$	$L_m > 4$	طول آبراهه اصلی
	$L_b < 2/75$	$L_b > 2/75$	$L_b > 2/75$	طول حوضه
مجموع خطاهای طبقه‌بندی: ۱۶	$L_b < 2/75$	$L_b > 2/75$	$L_b > 2/75$	طول حوضه
	-	$P < 1.0$	$p > 1.0$	محیط حوضه

کلیدی تعیین شدند.

نتایج تعیین عوامل مؤثر با آزمون تحلیل واریانس یک مرحله‌ای و آزمون مقایسه بونفرونی، طول حوضه را به‌عنوان یکی از عوامل چهارگانه مؤثر در این پژوهش معرفی کرده که با نتیجه مطالعاتی Wilford و همکاران (۲۰۰۴) در انتخاب عامل مؤثر طول حوضه در وقوع انواع جریان‌های سیلابی، هم‌خوانی کامل دارد. از طرفی، طول آبراهه اصلی (فاصله از مرز بالایی حوضه) و طول حوضه دارای مفهوم و ماهیت هیدرولوژیک نزدیکی هستند. طول حوضه فاصله پلانی‌متریک (دورترین نقطه فیزیکی حوضه از نقطه خروجی) در سوابق به‌عنوان یکی از عوامل متمایز کننده مطرح بوده است و در اینجا طول آبراهه اصلی (دورترین نقطه هیدرولوژیک حوضه از خروجی) مطرح شده است.

در تجزیه و تحلیل زوجی گروه سه‌گانه جریان‌های سیلابی، هنوز سیلاب واریزه‌ای در ردیف جدید و ناشناخته‌ای قرار گرفته و با سیلاب معمولی تفاوت معنی‌داری مناسبی را با توجه به عوامل مستقل محیطی ایجاد نمی‌کند.

بررسی سوابق مطالعاتی، نشان می‌دهد، از آن‌جا که حوضه‌های سیلاب واریزه‌ای در ردیف تفکیکی جدیدی قرار گرفته‌اند، در نتایج تجزیه و تحلیل واریانس عوامل، بین میانگین عوامل مؤثر در سیلاب و سیلاب واریزه‌ای اختلاف معنی‌داری چندانی مناسبی حاصل نمی‌شود. هر چند تحقیقات در آینده موجب توسعه مدل می‌شود.

از دیدگاه خطر، بیشتر شناخت و تفکیک حوضه‌های جریان واریزه‌ای و سیلاب واریزه‌ای دارای اهمیت می‌باشد. برای مثال، جریان واریزه تولید دبی اوج حدود ۲۰ برابر سیلاب واریزه می‌کند (Hunger و همکاران، ۲۰۰۱). نتایج این تحقیق نشان داد، به‌طور کلی، پارامترهای مورفومتری قابلیت پیش‌بینی رخداد انواع جریان‌های سیلابی را داشته، مبین تیپ ریخت‌سنجی رسوبات بستر در خروجی آبراهه هستند. طبق نتایج مطالعات Bowis و Jakob (۱۹۹۹)، Wilford و همکاران (۲۰۰۴) و Welsh و همکاران (۲۰۱۰) ضریب ملتون و طول آبراهه به‌عنوان پارامترهای اساسی معرفی شدند. در این تحقیق، عرض میانگین حوضه و طول آبراهه اصلی به‌عنوان عوامل

پراکندگی شاخص در زیرحوضه‌های بالای سد نشان داد، دو مورد طبقه‌بندی صحرائی حوضه‌های جریان واریزه‌ای، ناصحیح بوده که یک مورد به‌عنوان سیلاب و یک مورد به‌عنوان سیلاب واریزه‌ای مشاهده و دسته‌بندی شده است. طی بازدید مجدد و معاینه فنی محلی در این دو حوضه مشاهده شد، در بالای مقطع ارزیابی رسوبات جریان واریزه‌ای به‌علت وجود بهمن برفی، در پشت بهمن تثبیت شده، در اثر انتقال رسوبات واریزه‌ای بهمن به‌وسیله سیل به پایین‌دست؛ به‌صورت سیلاب و مورد دیگر به‌عنوان سیلاب واریزه‌ای بروز کرده است.

نتایج این تحقیق با یافته‌های Khaledi و Darvishin و همکاران (۱۹۹۸) در حوضه واز مازندران که فاصله از بالادست را یکی از مؤثرترین ویژگی‌های فیزیکی حوضه بر خصوصیات ریخت‌سنجی رسوبات برجامانده از آخرین سیلاب‌های رودخانه معرفی کردند و نیز پژوهش Adine و همکاران (۲۰۱۲) و Kavian و همکاران (۲۰۱۳) در منطقه قلعه سر استان مازندران که فاصله از بالادست حوضه را برای کنترل متغیرهای ریخت‌سنجی و به‌خصوص شاخص میانه قطر رسوبات معرفی کردند، مطابقت می‌کند.

بررسی و صحت‌سنجی طبقه‌بندی صحرائی و طبقه‌بندی شاخص مورفومتری: بررسی نمودار

جدول ۷- مقایسه نتایج صحت‌سنجی طبقه‌بندی جریان سیلابی حوضه‌ها به روش میدانی و روش مورفومتری

حوضه‌های بالای سد			حوضه‌های پایین سد			جریان سیلابی
طبقه‌بندی مورفومتری		طبقه‌بندی میدانی	طبقه‌بندی مورفومتری		طبقه‌بندی میدانی	
تعداد حوضه ناصحیح	تعداد حوضه صحیح/درصد		تعداد حوضه ناصحیح	تعداد حوضه صحیح/درصد		تعداد حوضه ناصحیح
یک حوضه سیلاب واریزه	۱۰ (۹۱)	۱۱	یک سیلاب واریزه	۲۸ (۹۳/۵)	۳۰	جریان واریزه‌ای
یک حوضه	۵ (۸۳)	۶	دو جریان واریزه	۱۴ (۸۷/۵)	۱۶	سیلاب واریزه‌ای
یک حوضه سیلاب واریزه	۷ (۸۷/۵)	۸	دو جریان واریزه‌ای و دو سیلاب واریزه	۲۰ (۸۳/۵)	۲۴	سیلاب عادی
۳	۲۲ (۸۸)	۲۵	۸	۶۲ (۸۸)	۷۰	مجموع حوضه‌ها

در طبقه سیلاب عادی چهار حوضه خارج از محدوده سیل و به‌صورت ناصحیح طبقه‌بندی شده‌اند، دو زیرحوضه که به نظر می‌رسد، در زمان بررسی و نمونه‌برداری رسوبات، به‌علت انجام عملیات پاک‌سازی بستر آبراهه بعد از وقوع جریان سیلابی از طریق جمع‌آوری سنگ‌های پراکنده و انتقال آن‌ها به‌عنوان منابع قرصه و نیز به‌علت تسطیح و لای‌روبی بستر رودخانه آثار جریان واریزه‌ای از بین رفته، به‌عنوان سیلاب عادی دیده شده، آثاری از رسوب جریان واریزه‌ای دیده نشده است. دو مورد خطای مشاهداتی دیگر مربوط به تشخیص چالش برانگیز نهشته‌ها بوده

در محدوده سیلاب واریزه‌ای، به اشتباه دو مورد در ناحیه جریان واریزه دیده می‌شوند. دلیل طبقه‌بندی ناصحیح، مشاهده تجمع مقادیر فراوان بار بستر مختلط واریزه‌ای در بازه میانی مخروط افکنه بوده است و تشخیص ناصحیح جریان واریزه‌ای می‌تواند به تغییرات شدید توپوگرافی و رسوب‌گذاری ناگهانی جریان واریزه‌ای در شیب مناسبی از مخروط افکنه مربوط باشد، ولی هیچ‌گونه شواهد دیگری از آثار ژئومورفیک جریان واریزه‌ای در آبراهه یا بر روی بقیه سطح مخروطه‌افکنه پیدا نشده است.

نتیجه‌گیری

ارزیابی، شناسایی و طبقه‌بندی انواع خطرات هیدروژئومورفیک، به‌منظور مدیریت مناسب استراتژیک و طراحی صحیح و متناسب عملیات آبخیزداری و حفاظت آب و خاک بسیار مهم می‌باشد. در برنامه‌ریزی و طراحی اهداف منطقه‌ای یا محلی، علاوه بر شناسایی میدانی فرایندهای هیدروژئومورفیک لازم است، برای پیش‌بینی انواع این فرایندها با استفاده از روش‌های ساده و بهره‌گیری از داده‌های مورفومتری حوزه آبخیز که با اندازه‌گیری و تجزیه و تحلیل مجموعه داده‌های توپوگرافی از نقشه‌های پایه همراه است، اقدام کرد. نتایج به‌دست آمده از این تحقیق، بینش تازه‌ای از ارزیابی سه نوع جریان سیلابی را ارائه کرده است. هدف از این مطالعه، بررسی اثر پارامترهای فیزیکی و ژئومورفولوژیک مؤثر بر رخداد انواع جریان‌های سیلابی بوده است. چهار عامل مورفومتری طول حوضه، عرض میانگین حوضه، طول آبراهه اصلی و محیط حوضه مؤثر انتخاب شدند و پس از تجزیه و تحلیل آن‌ها، دو عامل کلیدی طول آبراهه اصلی (فاصله از مرز بالایی حوضه) و عرض میانگین حوضه با آستانه عددی معین قادر به پیش‌بینی نوع جریان سیلابی حوضه‌ها انتخاب شدند. پارامترهای مورفومتری حوزه آبخیز (طول آبراهه اصلی و عرض میانگین حوضه) که با استفاده از سامانه GIS تهیه شده است، امکان پیش‌بینی پتانسیل اولیه رخداد سه نوع فرایند هیدروژئومورفیک (جریان واریزه‌ای، سیلاب واریزه‌ای و جریان سیلابی عادی) را در حوضه‌های مطالعاتی این سد کرج فراهم کرده است. نتایج آماری نشان داد که از بین مجموع متغیرهای محیطی چهار متغیر مربوط به شکل، محیط و شرایط آبراهه حوضه برای تفکیک و رخ دادن سه نوع جریان مورد نظر حائز اهمیت است. دیگر متغیرها همچون سنگ‌شناسی، شرایط تکتونیک به‌دلیل محدودیت‌های زمانی و برداشتی و نبود اطلاعات در حد مقیاس مناسب فراهم نبود، ولی معنی‌دار شدن متغیرهای فیزیوگرافی در مناطق کوهستانی و ناهمواری‌های جوان همچون البرز نماینده تأثیر شرایط زمین‌شناسی (ساختاری و جنس سنگ) می‌باشد. در واقع نتایج پژوهش‌های کمی ژئومورفولوژی

که منجر به طبقه‌بندی ناصحیح صحرایی شده است (تشخیص رسوبات سیلاب‌واریزه‌ای به‌جای جریان واریزه‌ای).

به‌منظور بررسی اعتبارسنجی روش مورفومتری، همان‌طور که قبلاً بیان شد، ابتدا، زیرحوضه‌ها به دو بخش تقسیم شدند: دسته اول، به‌منظور آموزش مدل از ۷۰ زیرحوضه بالای سد و دسته دیگر، برای آزمون مدل از ۲۵ حوضه پایین سد استفاده شد، حدود ۷۴ درصد از کل داده‌ها (۷۰ حوضه از ۹۵ حوضه) به‌عنوان داده‌های ورودی برای تجزیه و تحلیل عوامل مؤثر در وقوع جریان‌ها در مدل‌سازی عددی استفاده شد و حدود ۲۶ درصد داده‌ها به‌منظور آزمون مدل مورفومتری مورد استفاده قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده از تجزیه و تحلیل آماری داده‌های گروه آزمون مدل نشان داد، دو عامل طول آبراهه اصلی و عرض میانگین حوضه به‌عنوان شاخص‌های کلیدی انتخاب که نتایج بسیار نزدیکی با طبقه‌بندی میدانی گروه شاهد (زیرحوضه‌های پایین سد) به شرح زیر حاصل شد.

در نمودار پراکندگی شاخص حوضه‌های پایین سد، یک مورد جریان واریزه‌ای به اشتباه در گروه سیلاب واریزه‌ای قرار گرفته است که بر اساس تحقیقات به‌عمل آمده به‌علت فروریختن رسوبات کوهرفتی در هم آمیخته حاصل از وقوع یک لغزش شدید سنگی و راندگی اراضی بالادست آن به منطقه نمونه‌برداری در بازه زمانی فروکش سیلاب بوده که اشتباهاً به‌عنوان سیلاب واریزه‌ای محسوب شده است. در ناحیه سیلاب یک مورد از زیرحوضه‌ها به‌صورت ناصحیح به‌عنوان سیلاب واریزه‌ای طبقه‌بندی شده که علت آن بسته شدن پل با واریزه‌های چوبی و برگشت جریان و ملاحظه تجمع رسوبات با جورشدگی ضعیف و آثار ژئومورفیک سیلاب واریزه‌ای بوده است. یک مورد سیلاب واریزه‌ای در خارج از محدوده سیلاب واریزه‌ای و در طبقه سیلاب مشاهده شده، مهمترین علت این عدم تطابق را می‌توان به تأثیر عوامل خارج از کنترل پژوهش نسبت داد، مهمترین بخش این عوامل به مداخلات انسانی بر می‌گردد که به‌صورت لای‌روبی و تسطیح سایت برداشت نمونه بوده است.

شد. این مدل دارای دقت مطلوب در طبقه‌بندی صحیح حدود ۹۴، ۸۸ و ۸۳ درصد از حوضه‌های بالای سد و ۹۱، ۸۳ و ۸۸ درصد از حوضه‌های پایین سد، به ترتیب برای وقوع جریان واریزه‌ای، سیلاب واریزه‌ای و سیلاب عادی بوده است. در حوضه سد کرج به طور میانگین ۸۸ درصد از حوضه‌های مطالعاتی با استفاده از مدل مورفومتری صحیح طبقه‌بندی شده است. استفاده از روش مورفومتری و بررسی سازگاری مدل در شرایط مختلف منطقه‌ای، با استفاده از خصوصیات ثابت فیزیکی حوضه می‌تواند برای کارشناسان و مدیران طراحی و اجرایی در زمینه شناسایی دقیق و کنترل و مدیریت متناسب انواع خطرات هیدروژئومورفیک نویدبخش باشد.

نشان‌دهنده این است که خود متغیرهایی همچون طول آبراهه اصلی، مساحت و شکل حوضه تابع شرایط ساختاری زمین شناسی است. در منطقه البرز ساختارهای آبراهه‌ای بیشتر متأثر از شرایط ساختاری هستند تا جنس سنگ (انطباق زمین‌ساختی آبراهه). هر چند تا زمانی که عامل زمین‌شناسی همگن باشد، روابط ژئومورفومتری و هندسی حوضه به طور معقول معتبر است. روش مورفومتری به عنوان یک روش ساده و ارزان و مبتنی بر نقشه‌های توپوگرافی پایه برای به دست آوردن ویژگی‌های خاص مورفومتریک حوضه‌های آبخیز به عنوان یک ابزار مفید، جایگزین روش میدانی می‌باشد. به استناد نتایج این مطالعه، قابلیت مدل مورفومتری در پیش‌بینی صحیح رخداد سه نوع فرایند هیدروژئومورفیک، خیلی خوب ارزیابی

منابع مورد استفاده

1. Adine, F., A. Kavian, G.h. Vahabzadeh and A.V. Khaledi Darvishan. 2012. The effect of physical properties of the watershed on the properties of sedimentology and formation of river bed on downstream sediments: case study of Ghale Sar in Mazandaran Province. *Journal of Stratigraphy and Sedimentology Reaserches*, 28: 83-98.(in Persian).
2. Arattano, M. and L. Franzi. 2004. Analysis of different water-sdiment flow processes in a mountain torrent. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4: 783-791.
3. Banihabib, M. 1995. Investigation the appropriate conditions for the occurrence of debris floods in the country. Research Project of the Ministry of Energy Publication, 322 pages.
4. Blott, S.J. and K. Pye. 2001. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Journal of Earth Surface Processes and Landforms*, 26: 1237-1248.
5. Costa, J.E. 1988. Rheologic, geomorphic and sedimentologic differentiation of water floods, hyperconcentrated flow and debris flow. *Flood Geomorphology*, John Wiley and Sons, 611– 620.
6. Feiznia, S. 2008. Applied sedimentology (with emphasize on soil erosion and sediment production). University of Gorgan Press, 356 Pages.
7. Hunger, O., S.G. Evans, M.J. Bovis and J.N. Hutchinson. 2001. A review of the classification of landslides of the flow type. *Journal of Environmental and Engineering Geoscience*, 7: 221– 238.
8. Jandaghi, N., M. Ownegh, N. Birodian, A. Najafinejad and A. Amini. 2004. Comparison of granulometriy and three types of flood flow in Ziarat Watershed, Gorgan. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources of Gorgan*, 11: 30- 41 (in Persian).
9. Kavian, A., F. Adineh, Gh. Vahabzadeh and A.V. Khaledi Darvishan. 2013. Investigation of spatial variations of morphometric features of bed sediments in downstream of the river, case study: Ghale Sar Watershed, Sari. *Journal of Iran Natural Resources*, 66:131-144 (in Persian).
10. Khaledi Darvishin, A.V., S.H.R. Sadeghi., M. Vafakhah and L. Gholami. 1998. Recognition of the most effective physical characteristics of watershed on bed sediment morphometry, case study: Vaz River. Technical Report, *Water Resources Research*, 4: 75-78 (in Persian).
11. Ministry of Energy and Management and Planning Organisation Press. 2003. Guide line of sediment size experiments. Publication No. 269.
12. Mohseni, H. and S. Khodabakhsh. 1999. Factors of incidence and identification of separation indices of debris flow deposits. *Compressed Articles of the Third Conference of the Iranian Geological Society*, 1: 744.
13. Mosley, M.P. and D.S. Tindal. 1985. Sediment variability and bed material sampling in gravel-bed rivers. *Journal of Earth Surface Processes*, <https://doi.org/10.1002/esp.3290100506>.
14. Najafi Nejad, A. 2005. Sedimentology and hydrological properties of debris flood in Ziarat Basin, Gorgan. PhD Thesis, University of Tehran, 128 pages.
15. Najafi Nejad, A., S. Feiznia, M.E. Banihabib, H. Ahmadi and S. Zakikhani. 2007. Sedimentological

- characteristics of debris flows and its comparison with source areas, case study: Ziarat Watershed, Gorgan. Iranian Natural Resources, 60: 45-52 (in Persian).
16. Rezapoor Soltani, M. and M. Ghaemi Poor. 2012. Physiography and geomorphology of Tabarak catchment area located in the north of Quchan and its effect on sediment types. New Findings of Applied Geological, 14: 82-96 (in Persian).
 17. Pareta, K. and U. Pareta. 2011. Quantitative morphometric analysis of a watershed of Yamuna Basin, India using ASTER (DEM) data and GIS. International Journal of Geomatics and Geosciences, 2: 248-269.
 18. Soni, S. 2016. Assessment of morphometric characteristics of Chakrar Watershed in Madhya Pradesh, India using geospatial technique. Journal of Applied Water Science, 2: 36-49.
 19. Tribhuvan, P.R. and M.A. Sonar. 2016. Morphometric analysis of a Phulambri River Drainage Basin (Gp8 Watershed), Aurang Abad District (Maharashtra) using geographical information system. International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS, 5: 1813-1828.
 20. Welsh, A. and T. Davies. 2011. Identification of alluvial fans susceptible to debris-flow hazards. Journal of Landslides, 8: 183-194.
 21. Wilford, D.J., M.E. Sakals, J.L. Innes, R.C. Sidle and W.A. Bergerud. 2004. Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics. Journal of Landslides, 1: 61-66.
 22. Yamani, M., J. Jedari Eyvazi and M. Jahadi Toroghi. 2010. Types of flood flows occurring in the Madarsoo River (during catastrophic floods in August 2001 and 2002). Journal of Natural Geographic Researches, 72: 1-20 (in Persian).
 23. Zhang, W., Q. Wang, J. Chen, H. Li, J. Que and Y. Kong. 2015. Grain-size analysis of debris flow alluvial fans in Panxi area along Jinsha River. Journal of Sustainability, 7: 15219-15242.